

Windenergie



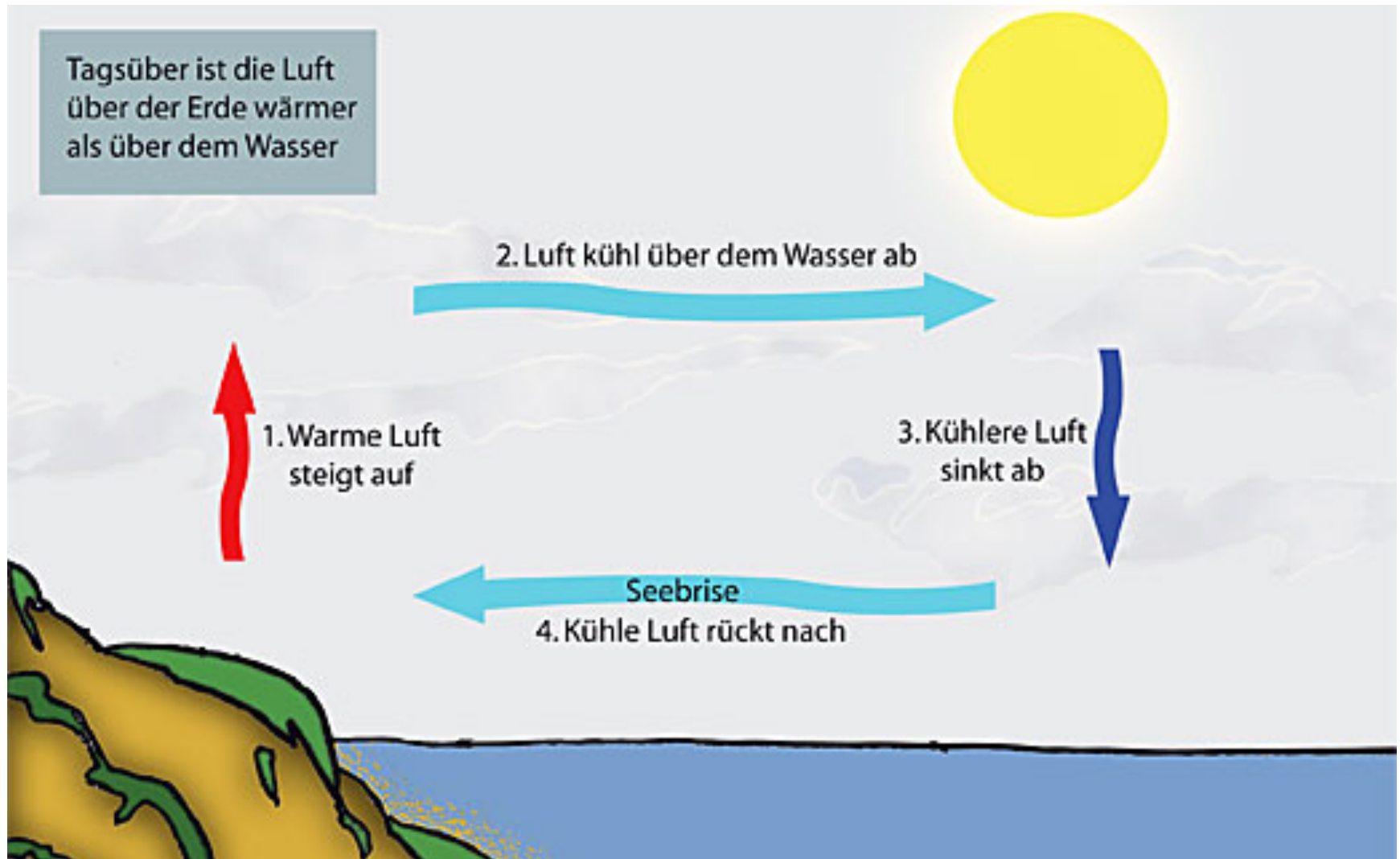
Inhalt

1. Was ist Wind?
 - 1.1 Entstehung von Wind
 - 1.2 Windvorkommen
 - 1.3 Beeinträchtigungen
2. Windkraftanlagen
 - 2.1 Bauarten
 - 2.2 Aufbau
3. Leistungsentnahme aus dem Wind
 - 3.1 Erläuterung
 - 3.2 Leistungsbeiwert
 - 3.3 Beispielrechnung
4. Wirtschaftlichkeit
5. Sicherheit
6. Auswahl des Standortes
 - 6.1 On-/Off-shore
7. Vor-/Nachteile von WKA
8. Entwicklung
9. Übung
10. Zukunft

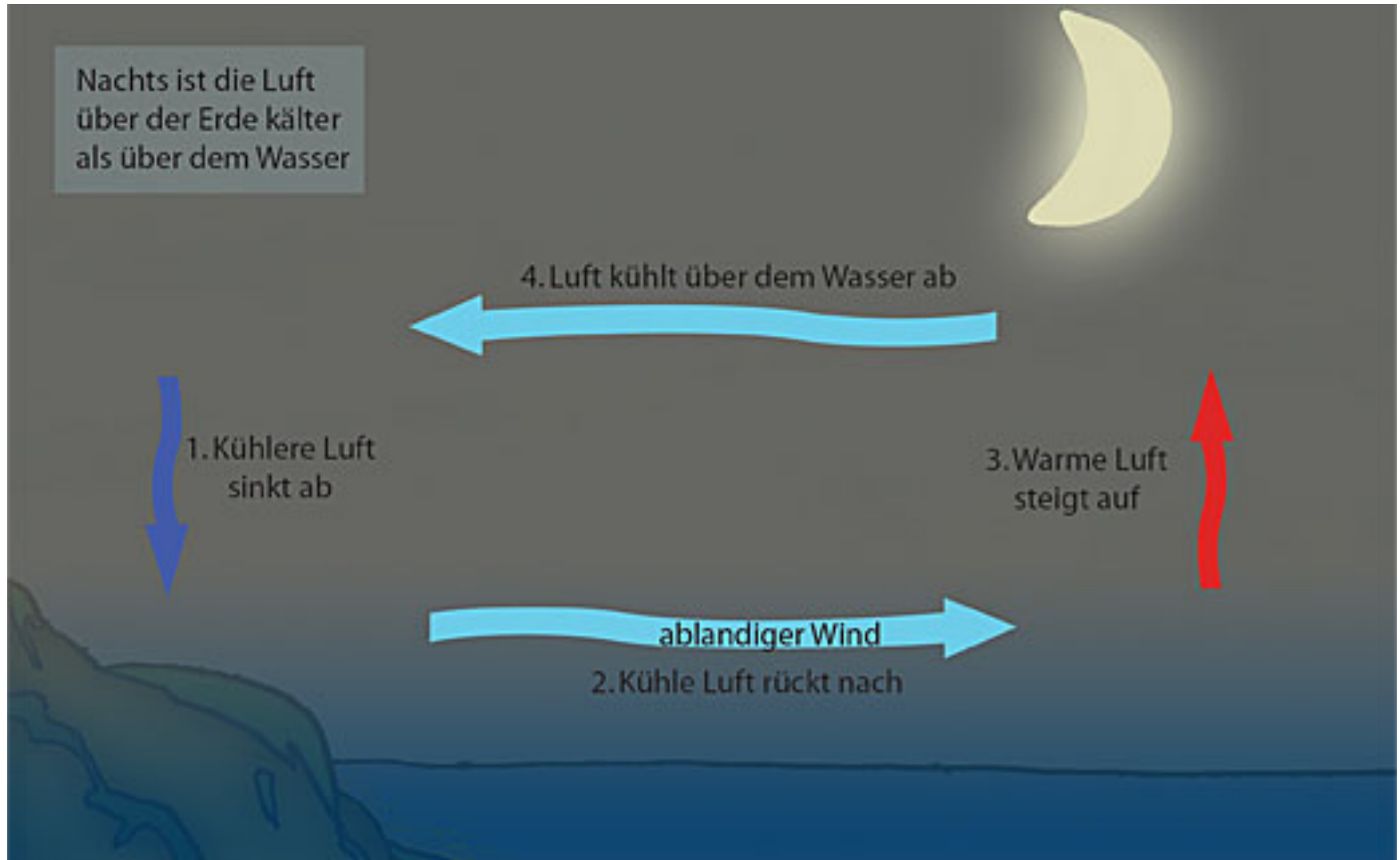
Was ist Wind und wie entsteht er?

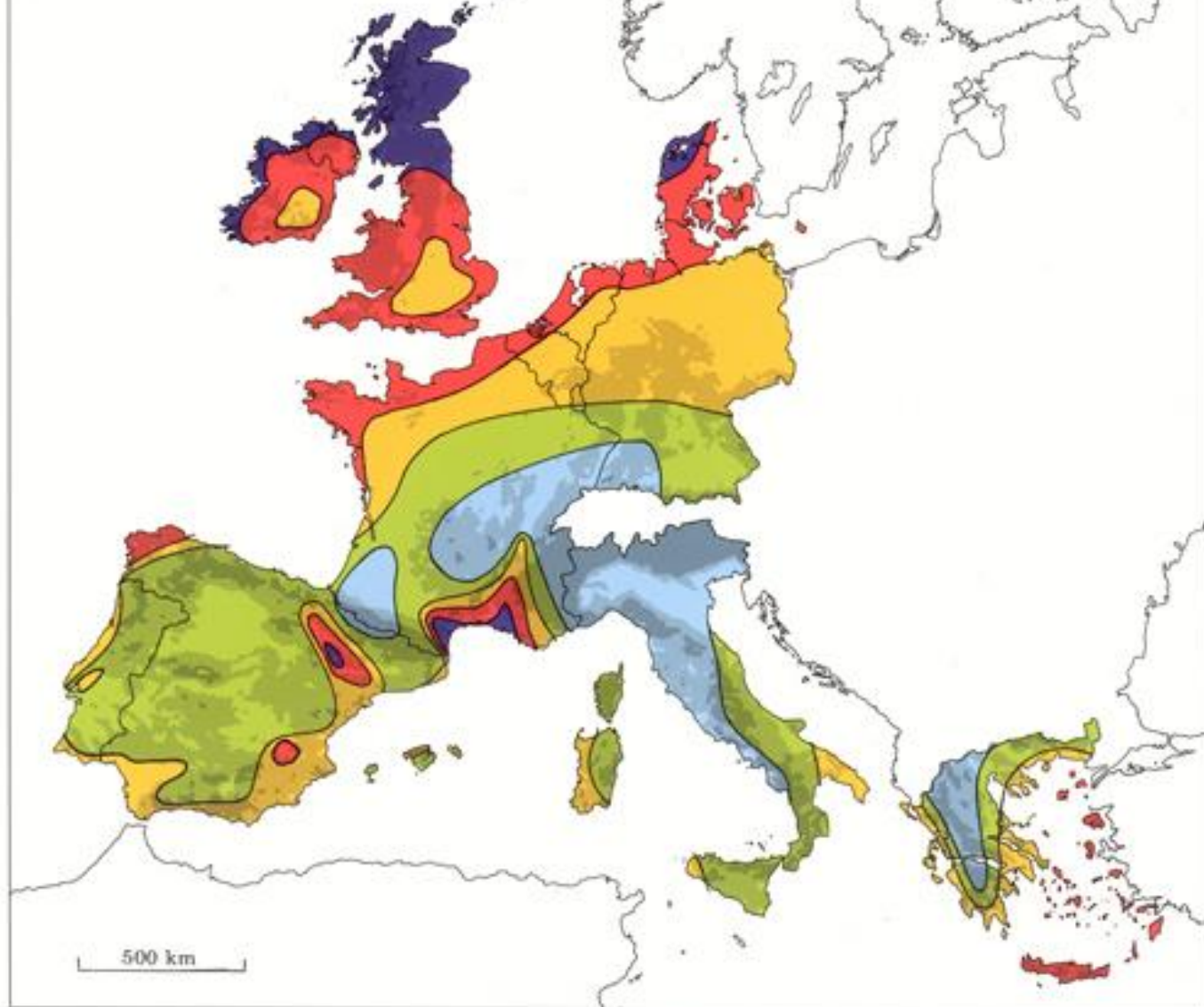
- Massenstrom
- Ungleiche Erwärmung der Erdoberfläche
- Temperaturunterschiede
- Kalte(Hochdruck) & warme(Tiefdruck) Luft
 - Kalte Luft verdichtet sich und fällt ab, warme Luft dehnt sich aus und steigt auf.
 - Ausgleich der Druckunterschiede
 - Größere Unterschiede = stärkere resultierende Winde

Entstehung von Wind Tag&Nacht



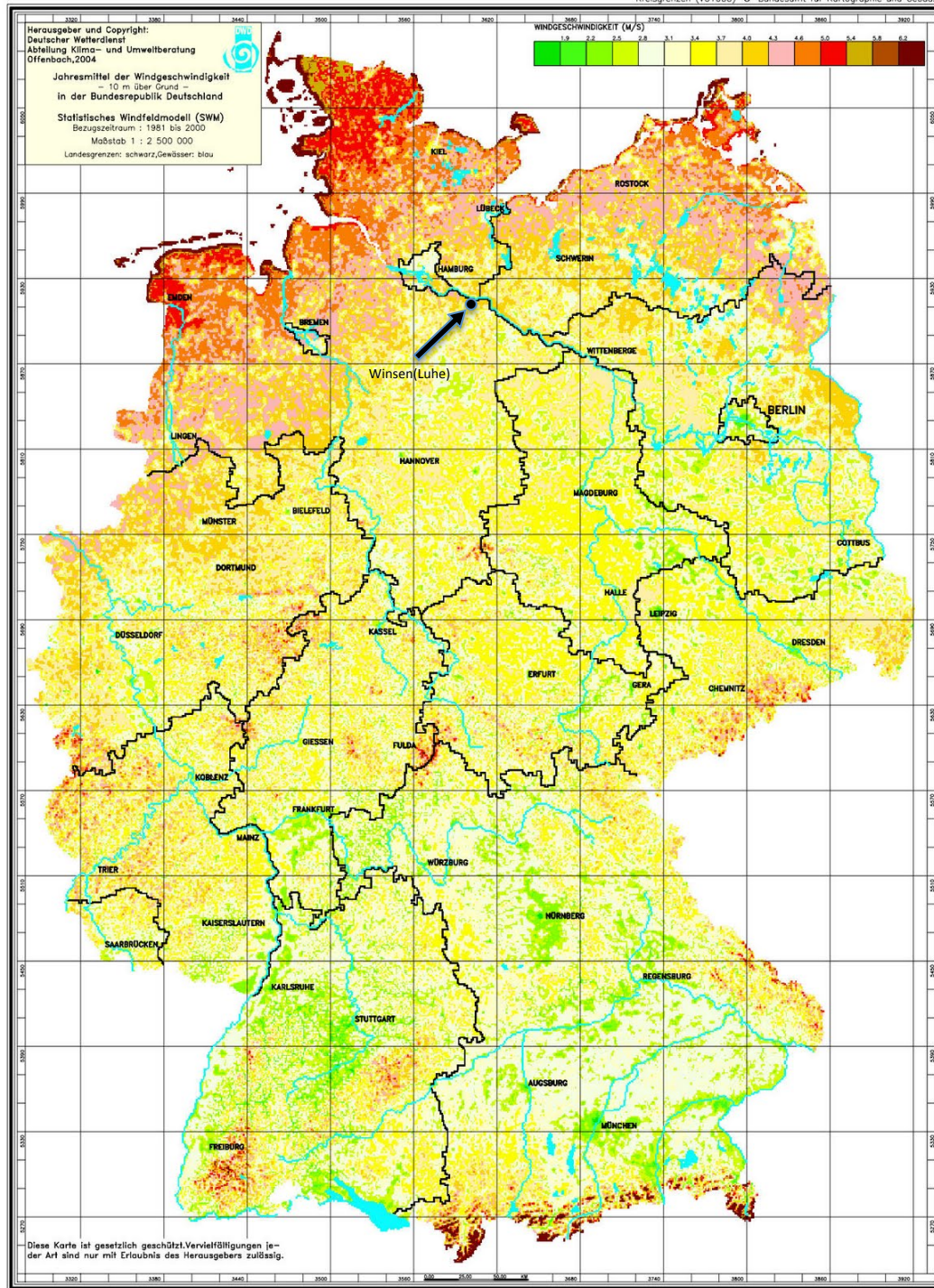
Entstehung von Wind Tag&Nacht





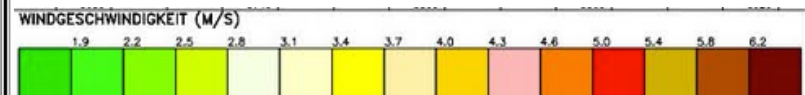
Wind resources¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions

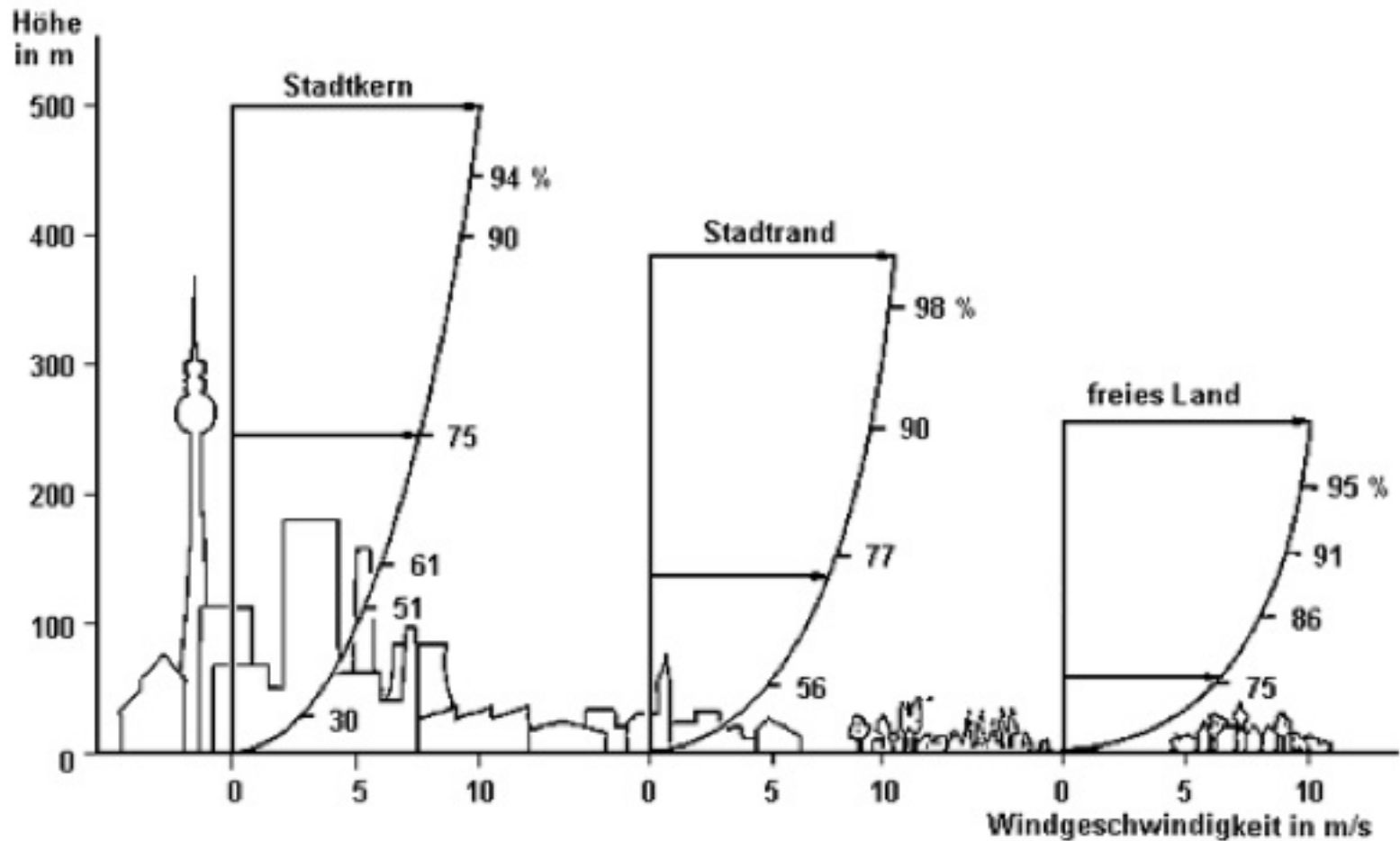
	Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶	
	m s^{-1}	Wm^{-2}	m s^{-1}	Wm^{-2}	m s^{-1}	Wm^{-2}	m s^{-1}	Wm^{-2}	m s^{-1}	Wm^{-2}
	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400



Windvorkommen

- beste Voraussetzungen
bevorzugt
in Küstengebieten
- in Süddeutschland
vereinzelt
gute Windgebiete
- Offshore sehr gute
Voraussetzungen





- Gebäude und andere Bebauungen bremsen den Wind aus
- daher optimale Standortwahl außerhalb von Städten
- ebenfalls bedingt durch Geräuschentwicklung

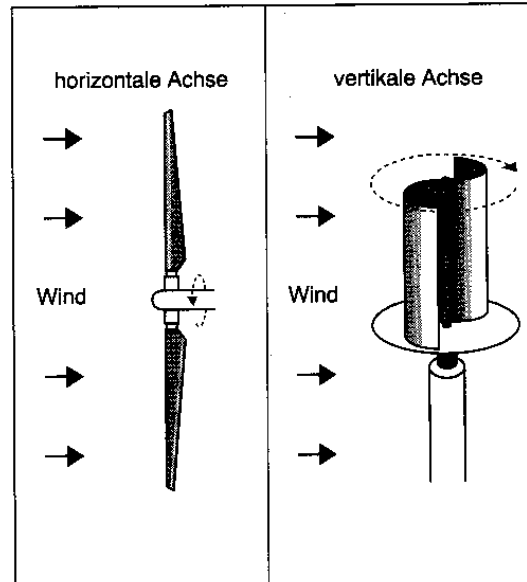
Windkraftanlagen



Bauarten

Auftriebsläufer

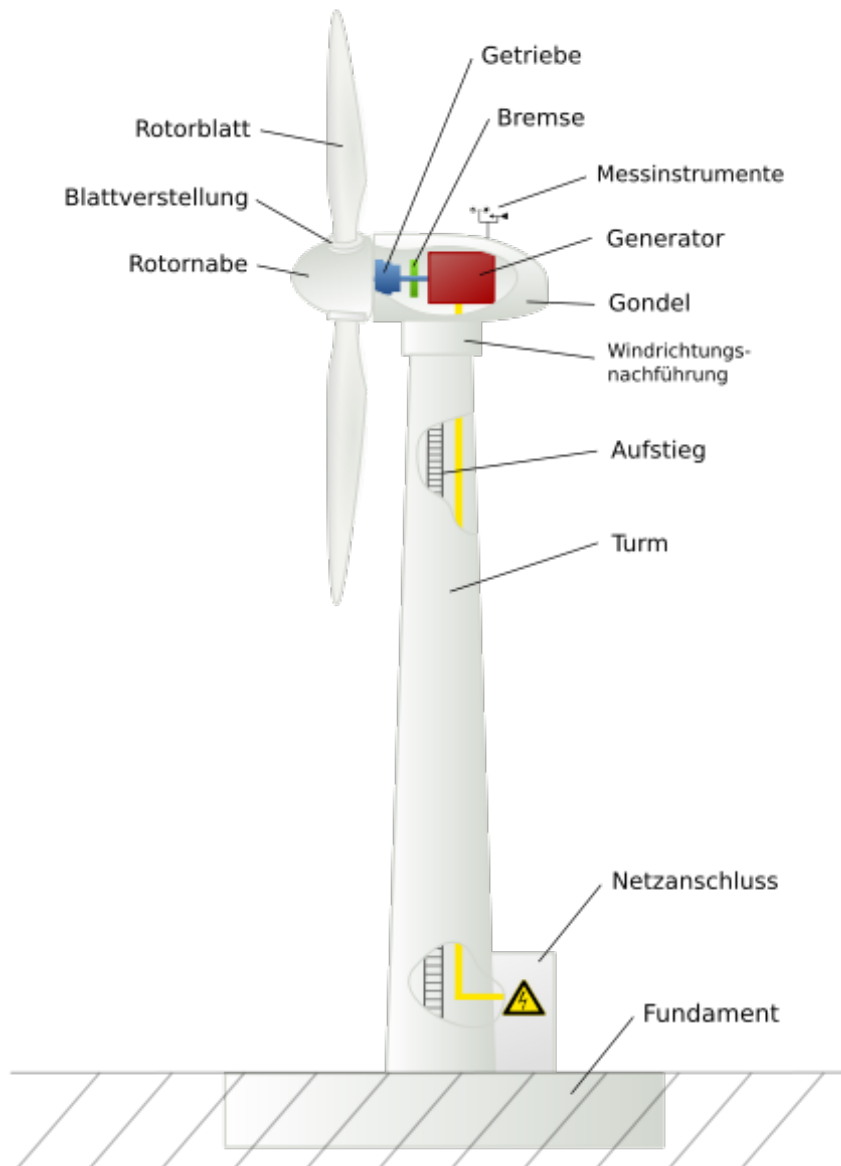
- höherer Wirkungsgrad
- ruhigere Laufeigenschaften
- gelangen durch Mast, bzw Turm in höhere Luftschichten



Widerstandsläufer

- niedrigere Anlaufgeschwindigkeit
- eher geeignet für turbulente Windverhältnisse
- keine Windnachführung notwendig

Aufbau einer horizontalen Windkraftanlage



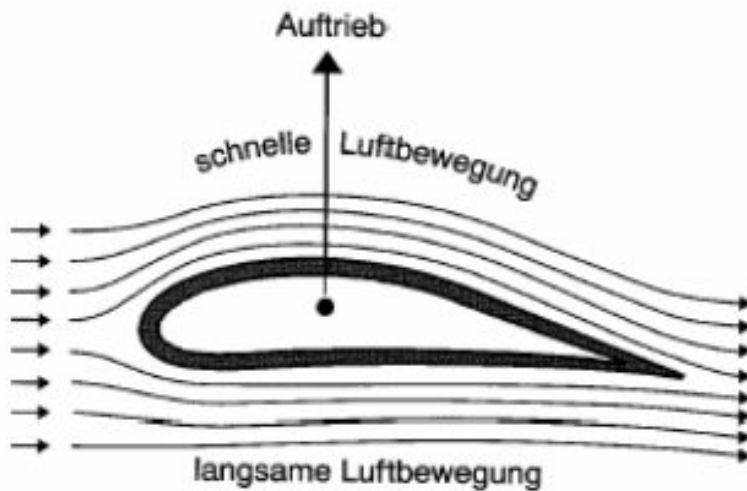
(mit Ring-Generator)

Rotorblätter



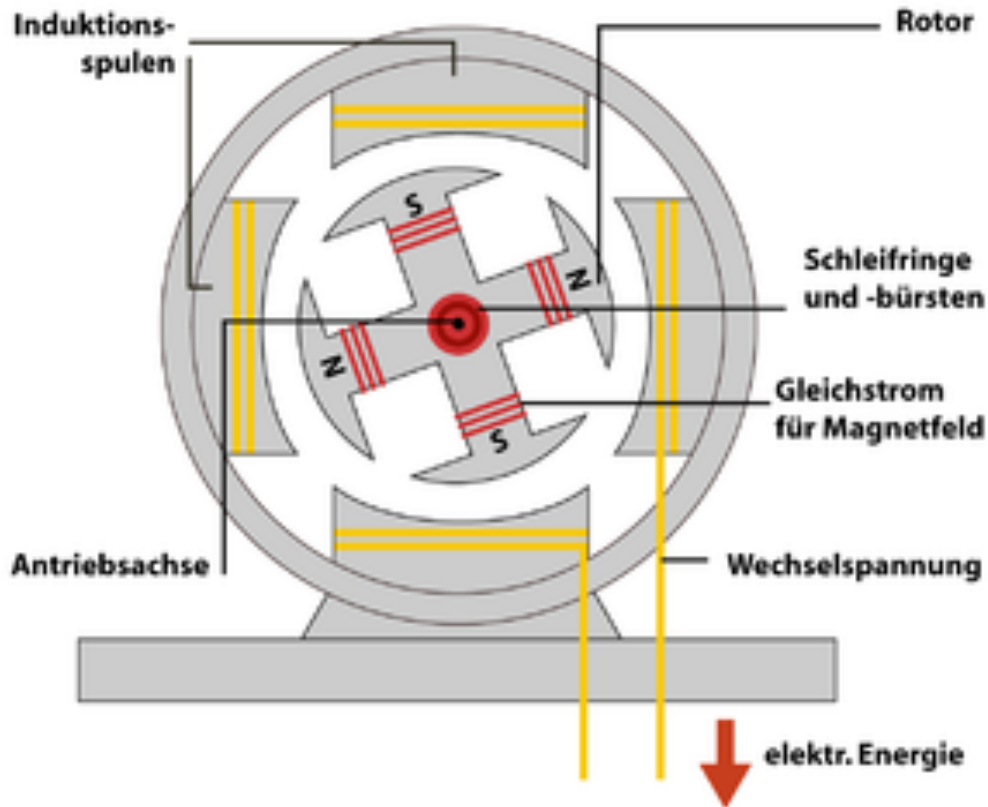
- meist aus glasfaserverstärkten Kunststoff
- selten auch kohlefaserverstärkt
- bestehend aus jeweils 2 Halbschalen
 - In Sandwich-Bauweise gefertigt
- integrierter Blitzschutz
- eingebaute Heizung, gegen Vereisung
- werden auf Biegung belastet
- „Zentrifugalkräfte aus der Rotation der Rotorblätter \Rightarrow konstante Zugbelastung bei konstanter Drehzahl“

Rotorblatt(Flügel)



- Prinzip des aerodynamischen Auftriebs
- durch Wölbung längerer Weg auf der Oberseite
- dadurch Schnellerer Fluss, als auf der Unterseite
- Druckunterschied zwischen oben(Unterdruck) und unten(Überdruck)

Generatorprinzip



Durch Induktion

- Bewegung eines Magnetfeldes
- Veränderung bewirkt Elektronenbewegung (Strom-Spannung) im Leiter (Spule)
- Stromfluss wird induziert
- Wechselstrom

Antrieb

- Normalantrieb
 - Rotor – Getriebe – Generator
 - Energieverlust durch Reibung
 - benötigt Strom zum Anlaufen
 - Wartungsempfindlich
- Direktantrieb
 - Rotor – Generator
 - effizienter
 - starke Permanent(meist Neodym)- oder Elektromagneten notwendig
 - seltene Wartung vonnöten(Vorteil zB. bei Offshore-Anlagen)

„Das schmutzige Geheimnis sauberer Windräder“

- <http://www.youtube.com/watch?v=gcP2Afp7xnE>



(60 Nd Neodym)

Leistungsentnahme aus dem Wind

- Teilweise Entnahme von kinetischer Energie aus Luftstrom
- Umwandlung in Rotationsenergie

Kinetische Energie: $E = \frac{m \times v^2}{2}$

Volumen: $V = A \times v = \pi \times r^2 \times v$

Luftmasse: $m = \rho \times V$

Volumen- & Massenstrom

Ein Volumenstrom ist das Volumen, welches sich innerhalb einer Zeiteinheit durch einen Querschnittbewegt.

$$\dot{V} = \pi * r^2 * v$$

Unter Massenstrom versteht man die Masse, die sich innerhalb einer Zeiteinheit durch einen Querschnitt bewegt

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} = \rho * \pi * r^2 * v$$

Berechnung der sich theoretisch der Luft zu entnehmenden Leistung(P)

Leistung:

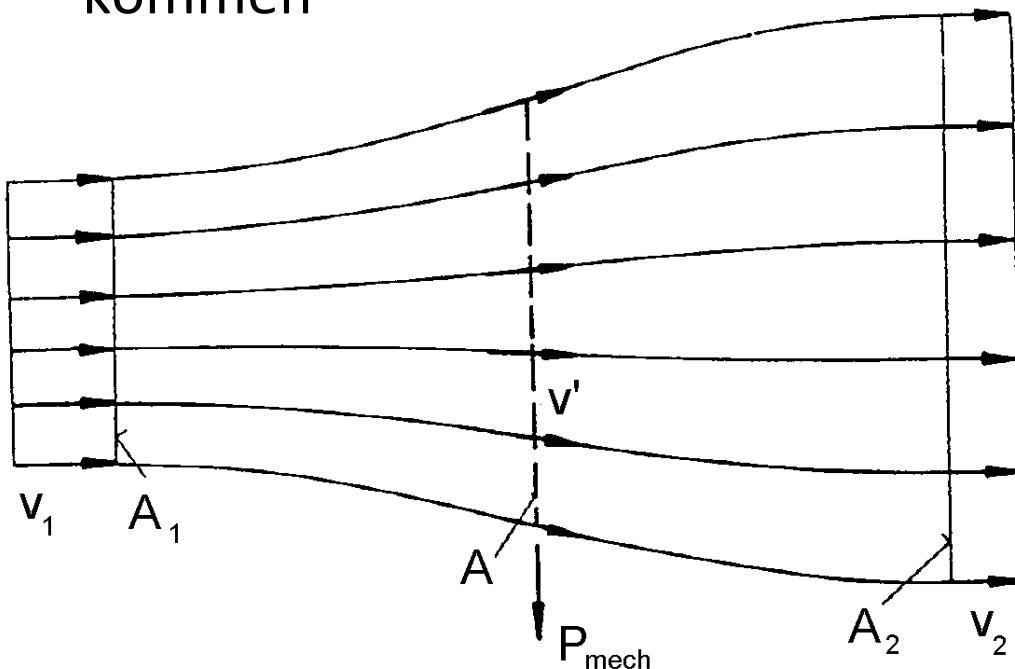
$$P = \frac{\rho \times \pi \times r^2 \times v^3}{2}$$

ρ = Luftdichte(Rho) in kg/m³

$$\rho = \frac{p}{R_f \cdot T}$$

Leistungsbeiwert(Wirkungsgrad)

- max. 59,3%
- Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor muss abnehmen
- Darf aber nicht zum Stillstand kommen



v_1 = „unbeeinflusste Windgeschwindigkeit vor dem Rotor“

v_2 = Windgeschwindigkeit in der Rotorfläche ($2/3$ von v_1)

v_3 = Windgeschwindigkeit kurz hinter dem Rotor ($1/3$ von v_1)

Beispielrechnung

Berechnen Sie die tatsächlich, durch den Rotor, entzogene Leistung einer WKA mit dem Rotordurchmesser 127m, sowie dem Leistungsbeiwert.

Außerdem gegeben:

- $p=1013,25\text{hPa}$
- $R=287,058\text{J/kg}\cdot\text{K}$
- 25°C
- $v_1=8\text{m/s}$; $v_2=4,8\text{m/s}$; $v_3=3\text{m/s}$

Formeln:

$$P_W = A_R \cdot \frac{p}{2} \cdot (v_1^2 - v_3^2) \cdot v_2 ; C_P = \frac{P_W}{P}$$

Rechnung:

(Luftdichte)

$$p = \frac{101325 Pa}{(287,058 \frac{J}{kg * K} * 298,15 K)}$$
$$p = 1,184 \frac{kg}{m^3}$$

(theoretische Leistung des
„unbeeinflussten Luftstroms“)

$$P = \frac{1,184 \frac{kg}{m^3} * \pi * (63.5m)^2 * (8 \frac{m}{s})^3}{2}$$

$$P = 3839,63 kW$$

(tatsächlich durch den Rotor
entzogene Leistung)

$$P_W = \pi * (63,5)^2 * \frac{1,184 \frac{kg}{m^3}}{2} * \left(\left(8 \frac{m}{s} \right)^2 - \left(3 \frac{m}{s} \right)^2 \right) * 4,8 \frac{m}{s}$$

$$P_W = 1979,81 kW$$

(Leistungsbeiwert)

$$C_P = \frac{1979,81kW}{3839,63kW}$$
$$C_P = 0,516$$

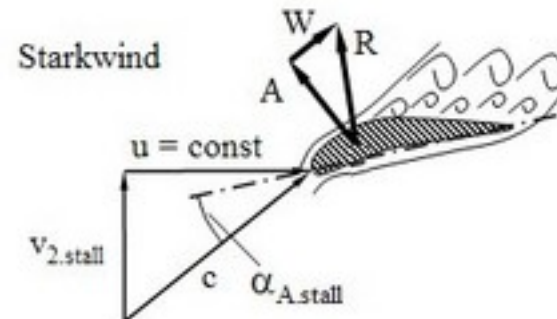
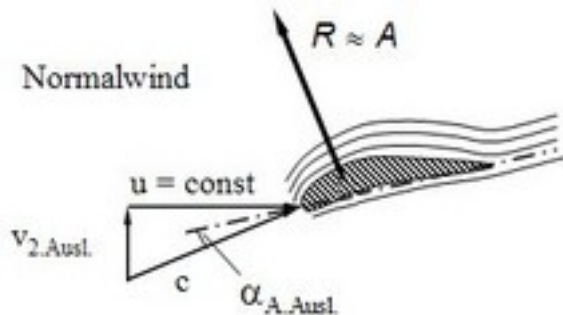
A: Es werden ca. 52% der kinetischen Windenergie in mechanische Leistung umgesetzt.

Wirtschaftlichkeit

- Baukosten
 - 1030 € pro kW
 - E-126 = 7,58-MW-Anlage = 8.1 Mio. €
- Betriebskosten:
 - Ca. 2% der Baukosten pro Jahr = 161.710 €
- Einspeisevergütung
8,84 Cent/kWh Onshore,
Offshore ca. 15 Cent/kWh
- Bei 2000 Volllaststunde pro Jahr =
15.160MWh = 1.340.144€ pro Jahr
(Onshore)
- Bei 4500 Volllaststunden pro Jahr =
34.110MWh = 5.116.500€ pro Jahr
(Offshore)

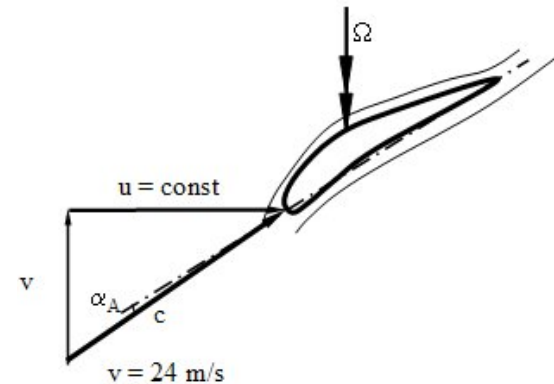
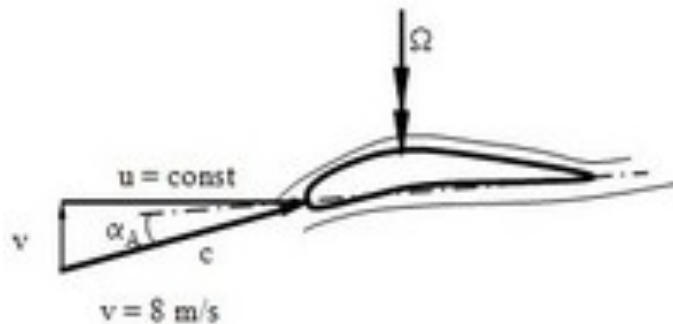
Sicherheit

- Begrenzung durch Strömungsabriss (Stall)
 - Rotorblätter sind fest mit der Nabe verbunden
 - nicht verstellbar
 - ab gewisser Windgeschwindigkeit zunehmende Turbulenzen



- Begrenzung durch Verdrehung der Rotorblätter(Pitch)

- Rotorblätter einzeln verstellbar
- werden bei hohen Windgeschwindigkeiten aus dem Wind gedreht
- dauerhafte Überwachung von Windgeschwindigkeiten und Leistungsabgabe erforderlich
- erhöhter Kostenfaktor



- Begrenzung durch Kombination aus Pitch & Stall
 - hohe Sicherheit
 - plötzliche Böen werden durch Stall ausgeglichen
 - langanhaltender Starkwind wird von der Pitchsteuerung entschärft
 - meist gewähltes Sicherheitssystem

Auswahl des Standorts

- das 10-Fache der Gesamthöhe(oder mindestens 1200m) als Mindestabstand zu Gebäuden, Naturschutzgebieten und anderen Bebauungen(laut NLT, regional aber abweichend)
 - aufgrund von Lärmentwicklung
 - und Schattenwurf
- Windvorkommen(oft und konstant)
- gute Bodenbeschaffenheit und Infrastruktur
- Berücksichtigung von Bürgerinteressen

Onshore

- Vorteile

- Schnellere Wartungen möglich
- kurzer Stromtransport
- geringere Aufbaukosten

- Nachteile

- Beeinflussung des Landschaftsbildes
- Lärmentwicklung
- teilweise keine konstante Windentwicklung

Offshore

- Vorteile

- sehr gute und konstante Windbedingungen
- Verschonung des Landschaftsbildes
- größere Windparks möglich

- Nachteile

- wartungsempfindlicher (folgend längere Ausfallzeiten)
- höhere Aufbaukosten
- lange Netzanbindungen für Stromtransport
- evtl. Beeinträchtigung der Tierwelt

Vor- & Nachteile von WKA

- Vorteile

- Wind als unbegrenzten Rohstoff
- langfristig günstiger Strom
- kurze Energierücklaufzeit

- Nachteile

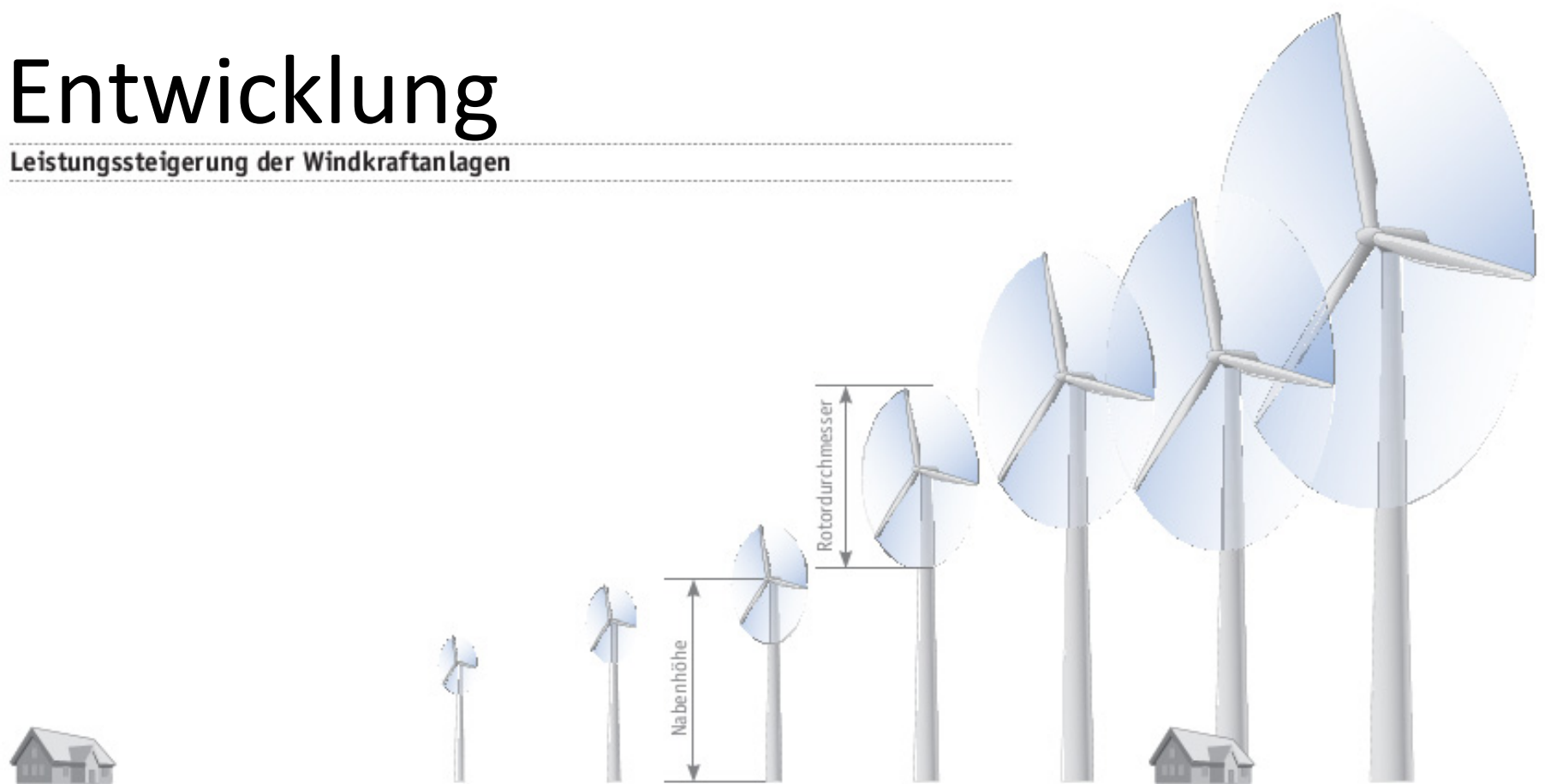
- Beeinträchtigung des Landschaftsbildes(Onshore)
- Wind kann nicht gespeichert werden
- fast ausschließlich in Küstenregionen sinnvoll
- evtl. Beeinträchtigung der Tierwelt

Wohin mit überschüssigen Strom?

- Wind kann nicht gespeichert werden
- erzeugter Strom muss direkt abgenommen werden
- von Verbraucher oder Stromspeicher(Bsp. PSK)
- Im Norden produziert im Süden gebraucht
- veraltetes Stromnetz
- Verluste beim Transport

Entwicklung

Leistungssteigerung der Windkraftanlagen



	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010
Nennleistung (in kW)	30	80	250	600	1.500	3.000	7.500
Rotordurchmesser (in m)	15	20	30	46	70	90	126
Überstrichene Rotorfläche (in m ²)	177	314	707	1.662	3.848	6.362	12.469
Nabenhöhe (in m)	30	40	50	78	100	105	135
Jahresenergieertrag (in MWh)	35	95	400	1.250	3.500	6.900	ca. 20.000

Quelle: Sunbeam, BWE

Übung

Berechnen Sie die tatsächlich, durch den Rotor, entzogene Leistung einer WKA mit dem Rotordurchmesser 46m.

Außerdem gegeben: - $p=1013,25\text{hPa}$

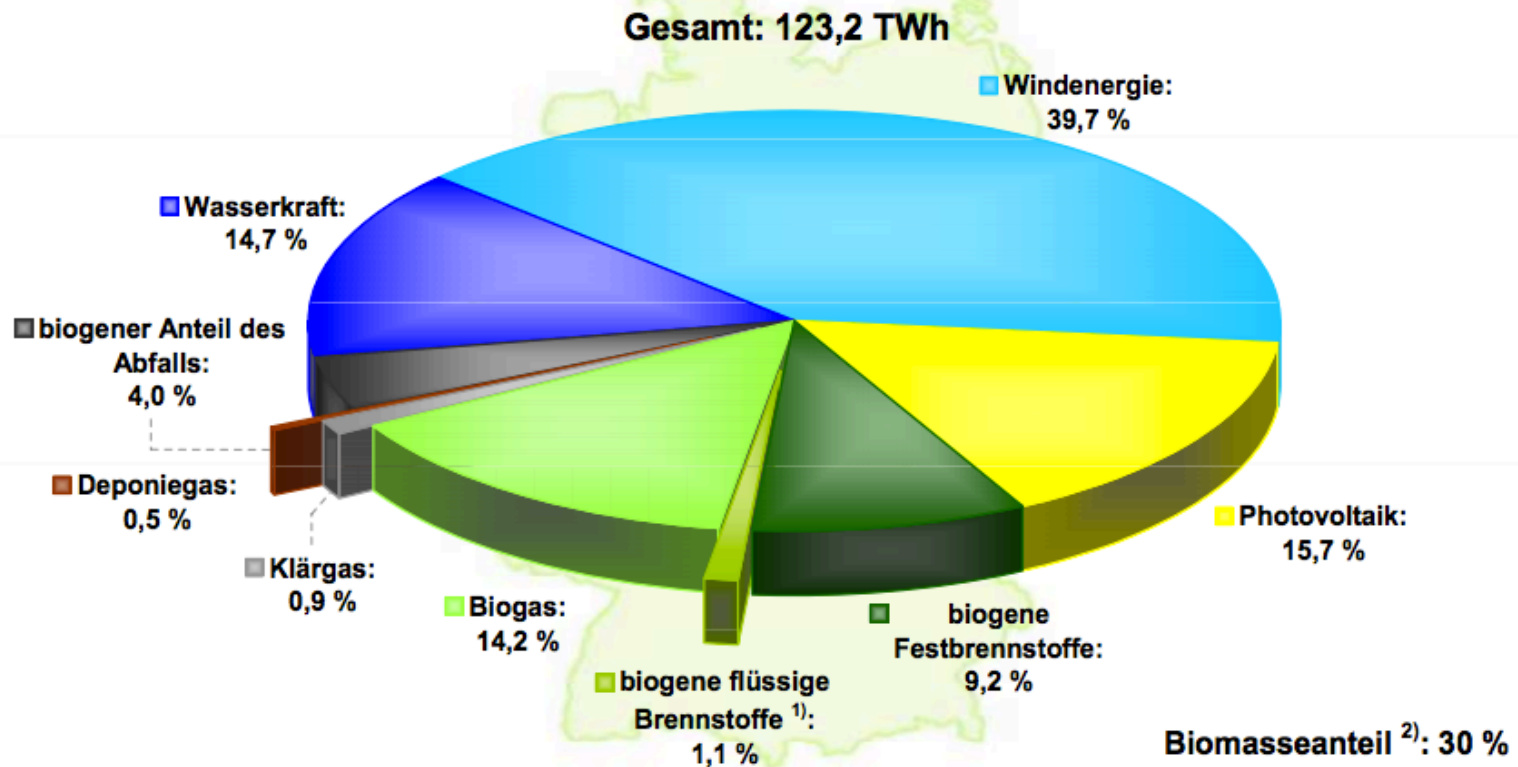
- $R=287,058\text{J/kg}\cdot\text{K}$

- 25°C

- $v_1=8\text{m/s}$; $v_2=4,8\text{m/s}$; $v_3=3\text{m/s}$



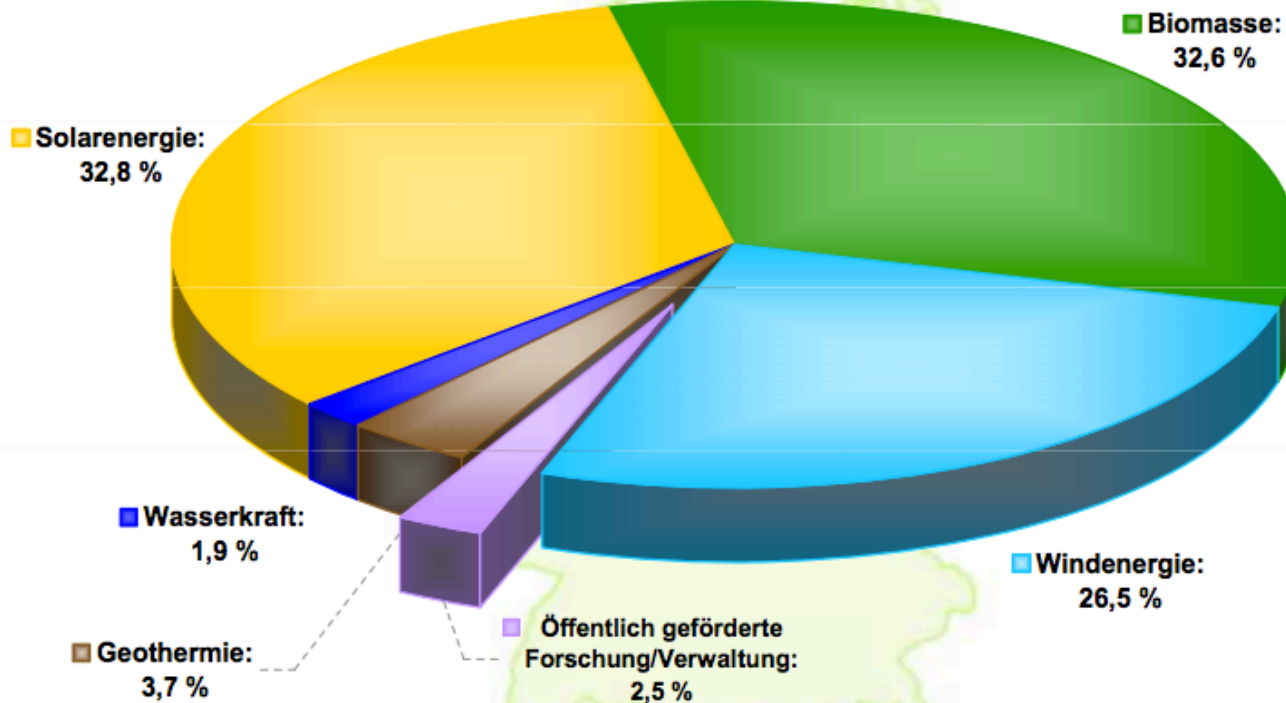
Struktur der Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2011



1) Inklusive Pflanzenöl; 2) Feste und flüssige Biomasse, Biogas, Deponie- und Klärgas, biogener Anteil des Abfalls; aufgrund geringer Strommengen ist die Tiefengeothermie nicht dargestellt;
1 TWh = 1 Mrd. kWh; Abweichungen in den Summen durch Rundungen; Quelle: BMU-KI III 1 nach Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat); Stand: Juli 2012; Angaben vorläufig



Anteilmäßige Verteilung der rd. 381.600 Arbeitsplätze im Bereich der erneuerbaren Energien im Jahr 2011



Angaben für 2011 Abschätzungen; Abweichungen in den Summen durch Rundungen;

Quelle: O'Sullivan (DLR), Edler (DIW), Nieder (ZSW), Rüther (ZSW), Lehr (GWS), Peter (Prognos): "Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien im Jahr 2011 – eine erste Abschätzung", Stand: März 2012; Zwischenbericht des Forschungsvorhabens „Kurz- und langfristige Auswirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf den deutschen Arbeitsmarkt“

Zukunft

- Verbesserung bestehender Anlagen durch Re-powering
- Ausbau von Offshore Windparks



Danke!

Quellenangabe

- Folie 3-8
 - <http://www.wir-lieben-segeln.de/theorie/wetter/entstehung-von-wind>
 - <http://de.wikipedia.org/wiki/Wind>
 - http://www.tk-logo.de/cms/bilder/a.284226.1/80/0/0/4f4ebdc4/Wind_Tag_520x350.jpg
 - http://www.tk-logo.de/cms/bilder/a.284225.1/80/0/0/d5d87e58/Wind_Nacht_520x350.jpg
 - <http://www.regenerative-zukunft.de/erneuerbare-energien-menu/windenergie>
- Folie 9-21
 - <http://reneweconomy.com.au/wp-content/uploads/2012/11/wind-turbines17.jpg>
 - <http://wotys.de/windkraft.htm>
 - <http://www.klein-windkraftanlagen.com/news/vertikale-windkraftanlagen-im-vergleich-mit-horizontalen-anlagen/>
 - <http://windenergie.lima-city.de/bilderinfoprojekt/winkraftanlageturm.jpg>
 - <http://www.hems-renewables.de/typo3temp/pics/c1ad53b5c1.jpg>
 - <http://www.wind-energie.de/infocenter/technik/funktionsweise/auftriebslaeuer>
 - <http://rze-falbala.rz.e-technik.fh-kiel.de/~waller/ftp/Windenergie/Windenergie04-05.pdf>
 - <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c2/Generator.png/300px-Generator.png>
 - <http://jumk.de/mein-pse/neodym.jpg>
 - <http://www.buergerwind-bayerwald.de/index.php/mythen-a-fakten/neodym-was-ist-das>
 - <http://www2.physik.uni-greifswald.de/~pompe/UP-VORLESUNG/up-windkraft.pdf>
 - <http://www.pa.msu.edu/~bauer/Energie/Talks/19-Windkraft.pdf>
 - http://www.uni-kassel.de/fb11/agrartechnik/Fachgebiet/pdf/physik/Projekte_2010/Handout_Windkraftanlagen.pdf
 - http://de.wikipedia.org/wiki/Betzsches_Gesetz
 - <http://www.elite.tugraz.at/Jungbauer/pics/Image38.gif>
 - <http://de.wikipedia.org/wiki/Luftdichte>
 - http://www.energiwerkstatt.org/download/Bauformen_Aerodynamik.pdf

- Folie 22-28

- <http://www.offshore-windenergie.net/politik-2/eeg-verguetung>
- <http://www.solar-und-windenergie.de/windenergie/kosten-und-bau-windkraftanlagen.html>
- http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/de/tour/econ/oandm.htm
- <http://www.uni-due.de/fb8/fbphysik/Hauptseminar/WS0506/Windenergie.pdf>
- http://www.repowering-kommunal.de/uploads/tx_tcdownloadmgr/NLT_Naturschutz_und_Windenergie_Januar_2011.pdf

- Folie 29-34

- http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_deutschland_graf_tab.pdf
- <http://www.wind-energie.de/sites/default/files/images/page/2011/technik/2012-02-17-groessenwachstum.jpg>
- <http://img.fotowelt.chip.de/imgserver/communityimages/692400/692418/1280x.jpg>